جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره بیست، زمستان ۱۳۹۵

صص ۱۹-۱

DOI: 10.22067/geo.v5i4.47594

پیش‌بینی محل وقوع زلزله احتمالی در استان خراسان رضوی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی

سلمان حیاتی[1]- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد لامرد، دانشگاه آزاد اسلامی، لامرد، ایران

یونس غلامی- استادیار جغرافیا، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

آسیه اسماعیلی- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بجنورد، دانشگاه آزاد اسلامی، بجنورد، ایران

مرتضی رضوی نژاد- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹٤/۱۲/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۹/۲

چکیده

استان خراسان رضوی به عنوان دومین استان پرجمعیت کشور با نزدیک به ٦ میلیون نفر ساکن، بیش از ۲۵۰۰ گسل در آن شناسایی شده که ٦۰٪ مساحت، ۷۵٪ شهرها و ۳۵٪ روستاها در حریم این گسل‌ها قرار دارد؛ **لذا** پیش‌بینی محل وقوع زلزله‌های آینده، می‌تواند در کاهش خطرات ناشی از زلزله در این استان بسیار سودمند باشد. هدف پژوهش، شناسایی مکان‌هایی است که احتمال رخداد زلزله در آن‌ها نسبت به سایر مناطق بیشتر می‌باشد. برای دستیابی هدف پژوهش، اطلاعات زلزله‌های ۸-٤ ریشتری رخداده در محدوده این استان بین سال‌های ۲۰۱٤-۱۹۰۰ میلادی با ویژگی‌های مکان، عمق، ساعت و بزرگی زلزله استخراج گردید. سپس با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی خودسازمان‌ده کوهونن به پیش‌بینی احتمال رخداد زلزله آتی و مکان آن پرداخته شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که میانگین بزرگی و عمق زلزله‌های اتفاق افتاده در این استان به ترتیب، ٤/٦ ریشتر و ۲۰/۹٦ کیلومتری سطح زمین بوده است. فراوانی ساعت وقوع زلزله‌ها در طی ۲٤ ساعت شبانه‌روز به تفکیک در فصول مختلف، از بعد ظهر تا ساعات اولیه بامداد اتفاق افتاده که اوج آن برای بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب در ساعات ۱، ۲٤، ۲۳ و ۲۲ است. همچنین ۱۲٪ جمعیت شهری و ۱۰٪ جمعیت روستایی استان در پهنه‌های با خطر نسبتاً بالا و بالا قرار دارد. بیشترین احتمال وقوع زلزله در منطقه مرکزی متمایل به غرب استان (شهرستان

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۳۰۵۵٦۰۱٦۳ Email: biseda30@gmail.com

کاشمر و جنوب شرق شهرستان‌های سبزوار و بردسکن) و در منطقه جنوب شرق استان (شهرستان خواف) با احتمال ۳۰٪، بالاتر نسبت به سایر مناطق پیش‌بینی شده است.
کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی محل وقوع زلزله، روش شبکه عصبی، استان خراسان رضوی.

۱. مقدمه

بر پایه آمارهای رسمی ۲۵ سال گذشته، ٦٪ از تلفات جانی کشور ناشی از زلزله بوده است (خاکپور و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۳). بررسی آمار لرزه‌های یک صد سال گذشته در ایران حاکی از آن است که حدود چهل زلزله با بزرگی بیش از ٦/٥ ریشتر و ١٤٤ زلزله با بزرگی بیش از ۵ ریشتر رخ داده است، بنابراین باید توجه داشت که در کشور ما به طور متوسط هر ۲/۵ سال یک زمین‌لرزه شدید یا خیلی شدید رخ می‌دهد (آرین، ۱۳۸۲: ۷) (خاتم[1]، ۲۰۰٦: ٤٦٢). بر اساس پژوهش‌های وزارت مسکن و شهرسازی در طرح کالبدی ملی، ۵۰٪ جمعیت شهری کشور در پهنه‌هایی زندگی می‌کنند که دارای بیشترین خطر زلزله‌خیزی است (فرجی و قرخلو، ۱۳۸۸: ۱٤۳).

پهنه‌بندی نقشه‌های زمین‌لرزه در ایران نشان می‌دهد که بیش از دو سوم وسعت کشور در محور پرخطر قرار گرفته که اکثر شهرهای پرجمعیت نیز در راستای آن استقرار یافته‌اند؛ مناطقی که بیشتر تحت تأثیر فعالیت گسلند و هم شدت زلزله زیاد و هم عمق کانون زلزله در آن‌ها کم می‌باشد (شایان و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۱) تا جایی که ۹۰٪ شهرهای کشور در برابر یک زلزله ۵/۵ ریشتری آسیب‌پذیر گشته‌اند (پورمحمدی و مصیب زاده، ۱۳۸۷: ۱۱۸). با در نظر گرفتن طول گسل‌های فعال کشور و منطقه خطر آن‌ها (۲۰ کیلومتر اطراف گسل)، ۳۵ درصد از مساحت کشور با خطر جدی زلزله مواجه است (نگارش، ۱۳۸٤: ٤۰)؛ لذا پتانسیل زلزله‌خیزی شهرهای ایران با توجه به فاصله آن‌ها از گسل‌ها به شرح زیر است:

- حدود ١٦/٦ درصد از شهرهای ایران بر روی خط گسل و یا در امتداد آن واقع شده و به جزء یک یا دو مورد، اکثر آن‌ها زلزله‌های بیش از ٦ ریشتر را تجربه کرده‌اند.
- تقریباً ٦٨ درصد از شهرهای کشور در حریم ۱ تا ۳۰ کیلومتری گسل‌ها قرار گرفته‌اند و این بدان معنی است که این گروه از شهرها به‌علاوه گروه قبلی از نظر پهنه‌بندی خطر نسبی در پهنه با شتاب‌های بالا واقع شده‌اند.
- همچنین ۹/۱ درصد از شهرهای کشور در فاصله ۳۰ تا ۵۰ کیلومتری (پهنه با شتاب‌های متوسط) استقرار یافته‌اند.
- ٦/۳ درصد از سکونتگاه‌های شهری ایران در فواصلی بیش از ۵۰ کیلومتری از گسل‌ها واقع شده و به این ترتیب در پهنه با شتاب‌های پایین قرار می‌گیرند (زمردیان، ۱۳۹۱: ۱۳٦).

1 Khatam

استان خراسان رضوی که در محدوده شمال شـرقی ایـران قـرار دارد، در سرشـماری سـال ۱۳۹۰ دارای جمعیـت ۵۹۹٤٤۰۲ نفری بوده است که از این تعداد ٤۳۱۱۲۱۰ نفر ساکن شهرها، ۱٦۸۲٤۰۵ نفر ساکن روستاها و ۷۸۷ نفـر نیـز غیر ساکن می‌باشند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰). بر اساس مطالعات آمایش سـرزمین در اسـتان خراسـان رضـوی، ۷۱٪ از مساحت این استان در پهنه با خطر متوسط تا بالا قرار گرفته است (جهاد دانشگاهی مشـهد، ۱۳۸۹: ۲۳) کـه تعـداد ۲٤ شهر با جمعیت دو میلیون نه صد هزار نفر و ۱۰٦۳ روستا با جمعیت پانصد هشتاد هزار نفر در پهنه‌های با خطـر نسـبتاً بالا و بالا قرار گرفته‌اند. در این استان تـا بـه حـال بـیش از ۵۵۰۰ گسـل بـزرگ و کوچـک شناسـایی شـده کـه ٦۰٪ مساحت، ۷۵٪ شهرها و ۳۵٪ روستاها در محدوده حریم این گسل‌ها قرار گرفته‌اند. این در حـالی اسـت کـه فقـط ۲۸ درصد مساکن استان دارای اسکلت فلزی و بتن آرمه و ۷۲ درصد مساکن نیز از سایر مصالح اسـتفاده کـرده‌انـد (مرکـز آمار ایران، ۱۳۹۰) که در برابر زلزله آسیب جدی خواهند دید. این وضعیت نشان می‌دهد که در صورت بـروز زلزلـه‌ای بزرگ در سطح استان خراسان رضوی با فاجعه روبه‌رو خواهیم بود چرا که باعـث تلفـات جـانی و مـالی بسـیار زیـاد خواهد شد؛ لذا در پژوهش حاضر سعی شده است تا با استفاده از ویژگی‌های زلزله‌های اتفاق افتاده در اسـتان خراسـان رضوی از سال ۲۰۱٤ – ۱۹۰۰ میلادی، مکان‌های با احتمال بیشتر وقوع زلزله مشخص و در اولویت برنامه‌ریـزی قـرار گیرد.

۱. ۲. پیشینه تحقیق

امروزه روش‌های مختلف برای پیش‌بینی مکان زلزله‌های احتمالی آینده بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در ایـن زمینه کارشناسان ژاپنی اولین کسانی بودند که طی سـال‌هـای ۱۹٦۳–۱۹٦۰ بـا همکـاری آمریکـا و بـا تشـکیل کمیتـه پیش‌بینی زلزله به این امر پرداختند. همچنین توجه به این امر از سال ۱۹٦۷ در شوروی سابق آغاز گردیـد و در همـین زمان دولت چین نیز به سرمایه‌گذاری در این زمینه پرداخـت (برگـی، ۱۳۹۲: ٤۹). در سـال ۱۹۷۵ چینـی‌هـا توانسـتند زلزله‌های چانگ را بر اساس ثبت و بررسی بزرگی و افزایش تعداد زلزلـه‌هـای کوچـک، پـیش‌بینـی نمـوده و منطقـه وسیعی را تخلیه کنند. قابل توجه است که ۱۸ ماه بعد زلزله تانک شان چین به بزرگی ۷/۸ ریشتر جـان ۷۵۰ هـزار نفـر را گرفت. البته نباید فراموش کرد که ظرف دو سال از ۳۱ پیش‌بینی که در چین در مورد وقـوع زلزلـه انجـام یافتـه، ۱۸ فقره آن صحیح، ۷ مورد آن مشکوک و ٦ مورد آن کاملاً غلط بود (خطیری یانسری و همکاران، ۱۳۸۷: ۱).

اعظم و همکاران در مطالعه‌ای به پیش‌بینی زلزله مبتنی بـر تکنیـک‌هـای هـوش مصـنوعی در اسـلام‌آبـاد پاکسـتان پرداخته‌اند و با استفاده از روش‌های الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی به پیش‌بینی فضـاهایی بـا احتمـال متوسـط وقـوع زلزله پرداخته‌اند و نتیجه گرفته‌اند که در حال حاضر یکی از بهترین روش‌های موجـود بـرای پـیش‌بینـی زلزلـه روش

شبکه عصبی است، زیرا می‌تواند ساختارهای پیچیده و غیرخطی را به خوبی مدل‌سازی نماید (اعظم[1] و همکاران، ٢٠١٤).

موسترا و همکاران در سال ٢٠١١ در پژوهشی با عنوان استفاده از شبکه عصبی در پیش‌بینی زلزله با استفاده از داده‌های سری زمانی و سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای در یونان پرداخته‌اند و نتیجه گرفته‌اند که شبکه عصبی مصنوعی توانسته است ٨٠/٥٥ درصد تمام رویدادهای لرزه‌ای و ٥٨/٠٢ درصد زمین‌لرزه‌های با بزرگی بیش از ٥/٢ در مقیاس ریشتر را پیش‌بینی کند (موسترا[2] و همکاران، ٢٠١١).

عبدالرحمان و همکاران در سال ٢٠١٣ در مطالعه‌ای با عنوان پیش‌بینی زلزله با استفاده از روش شبکه عصبی در منطقه شمالی دریای سرخ با استفاده از اطلاعات زلزله‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه به پیش‌بینی محل زلزله‌های محتمل پرداخته‌اند. آن‌ها شبکه عصبی با چند لایه پنهان را پیشنهاد می‌کنند که شامل چهار مرحله اکتساب داده‌ها، قبل از پردازش، استخراج ویژگی و آموزش شبکه عصبی به همراه تست باشد و در نهایت نتیجه گیری کرده‌اند که شبکه‌های عصبی حداقل ٣٢٪ بهتر از سایر روش‌ها توانسته پیش‌بینی محل‌های محتمل را انجام دهند (عبدالرحمان[3] و همکاران، ٢٠١٣).

شعبانیان و همکاران در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی زلزله‌های استان مازندران، با استفاده از شبکه عصبی به جای استفاده از سری زمانی تغییرات بزرگی زلزله به عنوان متغیر ورودی شبکه عصبی، از سری تغییرات زمانی پارامتر b در قانون گوتبرگ – ریشتر و اوموری – اوتسو که بر اساس سری تغییرات بزرگی زلزله به دست آمده است استفاده کرده و نتیجه گرفته‌اند که شبکه عصبی قادر است به طور غیر مستقیم، گوتبرگ – ریشتر و اوموری – اوتسو را فرا گیرد که این امر توانایی بالای این تکنیک را در زمینه زلزله شناسی نشان می‌دهد (شعبانیان و همکاران، ١٣٩٤).

گرامی و همکاران در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی آماری پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در استان‌های سمنان و قم پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که در منطقه مرکزی استان قم احتمال رخداد زلزله ٣١/٦ درصد و در منطقه شمالی استان سمنان نیز ٢٨/٩ درصد پیش‌بینی شده است (گرامی و همکاران، ١٣٩١).

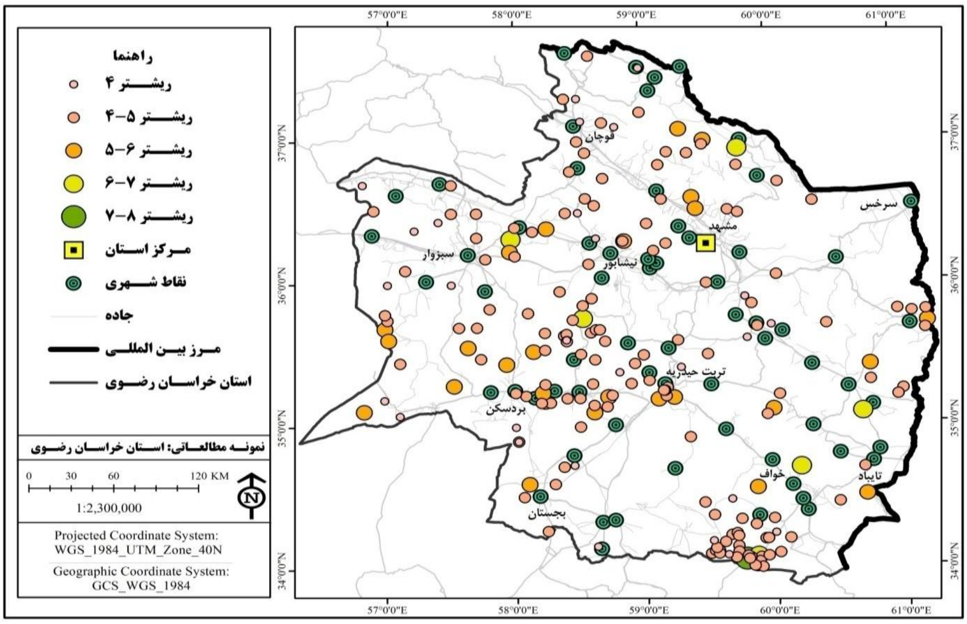
٢. محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی پژوهش استان خراسان رضوی می‌باشد که در زیر به ویژگی زلزله‌های رخ داده از سال ٢٠١٤-١٩٠٠ میلادی و وضعیت لرزه‌ای استان با توجه با حریم گسل‌ها اشاره شده است.

1 Azam
2 Moustra
3 Abdulrahman

۱. ۲. بررسی زمین‌لرزه‌های گذشته استان خراسان رضوی

شکل ۱ که بر اساس اطلاعات موجود در سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۱٤ میلادی ترسیم شده است، زلزله‌های رخ داده در استان خراسان رضوی را با بزرگی ٤ تا ۸ ریشتر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در این مدت ۱۹۹ زلزله اتفاق افتاده است.



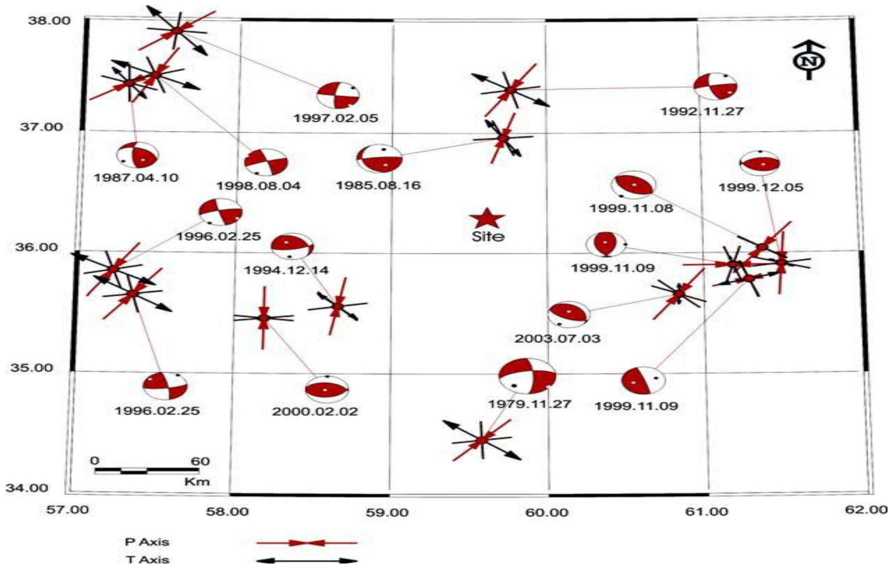
شکل ۱: زلزله‌های رخ داده در استان خراسان رضوی طی سال‌های ۲۰۱٤- ۱۹۰۰ میلادی

مآخذ: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله[1]، ۱۳۹۳/ ترسیم: نگارندگان

در شکل ۲ نیز موقعیت مکانی زمین‌لرزه‌های مهم استان خراسان رضوی همراه با راستای بردارهای فشاری و کششی و صفحه‌های گسلی آن‌ها بر پایه اطلاعات موجود در دانشگاه هاروارد ارائه شده است.

---

1 www.iiees.ir



شکل ۲: سازوکار زمین‌لرزه‌های مهم خراسان رضوی بر پایه اطلاعات موجود در دانشگاه هاروارد

مآخذ: حیاتی و همکاران، ۱۳۹٤: ٤

جدول زیر نیز معروف‌ترین زلزله‌های رخ داده شده در استان خراسان رضوی را نشان می‌دهد.

جدول ۱: تاریخچه زمین‌لرزه‌های معروف در استان خراسان رضوی

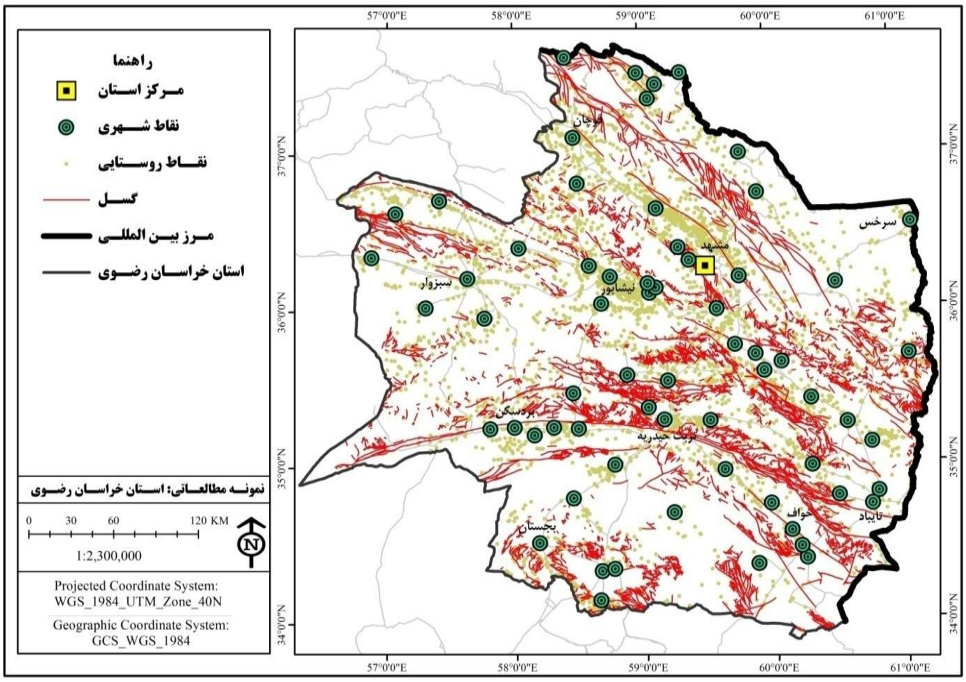
ردیف	زمان و مکان زمین‌لرزه	قدرت	شدت و وسعت تأثیر
۱	۱۱٤٥ میلادی نیشابور	٥/۳	ویرانگری محلی در شهر نیشابور.
۲	۱۲۰۹ میلادی نیشابور	۷/۳	در بخش بزرگی از خراسان باختری حس شده و منطقه نیشابور قلا ویران شد. درمجموع نزدیک به ۱۰ هزار نفر کشته شدند.
۳	۷ اکتبر ۱۲۸۹ میلادی نیشابور	۷/۱	۱۰ هزار نفر کشته شدند.
٤	فوریه ۱۲۸۹ نیشابور	۷/۳	شهر نیشابور ویران شد.
٥	۲۳ نوامبر ۱٤۰٥ میلادی	۷/٤	بیش از ۳۰ هزار نفر جان باختند.
٦	۱٦۱۹ میلادی دوغ آباد	٦/٥	حدود ۸۰۰ نفر کشته شدند.
۷	۳۰ ژانویه ۱٦۷۳ مشهد	٦/٦	دو سوم شهر ویران شد. ٤۰ هزار تن کشته و ۱٦ هزار نفر مجروح شدند.
۸	۲٥ می ۱۹۲۳ کاج ندمت	–	۷۷۰ نفر جان باختند.
۹	۲۱ اوت ۱۹۲۸ میلادی نیشابور	–	نیشابور، سبزوار و شیروان ویران شدند.
۱۰	۱۳ ژانویه ۱۹۲۹	٦/۱	مستندی موجود نیست.

مآخذ: اکبری مطلق و همکاران، ۱۳۹۱: ۱٥

۲. ۲. بررسی زلزله‌خیزی استان خراسان رضوی با توجه به حریم گسل‌ها

بررسی گسل‌ها و پهنه‌بندی استان خراسان رضوی بر اساس فاصله از این گسل‌ها نشان می‌دهد که:

- حدود ۴۰٪ از مساحت استان خراسان رضوی در محدوده امن و حدود ۶۰٪ از مساحت آن در نزدیکی خطوط گسل واقع شده‌اند.
- دو منطقه پر تراکم گسلی یکی در بخش شمالی استان و دیگری در بخش میانی استان به چشم می‌خورد که بیانگر پرخطر بودن این مناطق می‌باشد، چرا که در این دو بخش استان خروج از حریم یک گسل به معنای ورود به حریم گسل بعدی است.
- طول گسل‌های موجود در استان از شمال به طرف جنوب بیشتر می‌شود که می‌تواند دلیلی برای بزرگی و شدت زمین‌لرزه‌های نیمه جنوبی استان نسبت به نیمه شمالی آن باشد.



شکل ۳: گسل‌های شناسایی شده در محدوده استان خراسان رضوی

مآخذ: جهاد دانشگاهی مشهد، ۱۳۸۹: ۴۵/ ترسیم: نگارندگان

جدول ۲: پتانسیل زلزله‌خیزی شهرهای بزرگ استان خراسان رضوی با توجه به حریم گسل‌ها

ردیف	نام شهر	فاصله از گسل KM	نام گسل	طول تقریبی گسل KM	سابقه زلزله	بزرگی زلزله (ریشتر)
۱	مشهد	۱	مشهد- چناران	۹۰	دارد	-
۲	قوچان	۱۵	-	۱۵۰	دارد	-
۳	نیشابور	۱۲	گسل نیشابور	۲۰	دارد	٦-٥
٤	سبزوار	۱	-	۲٥	دارد	-
٥	تربت‌حیدریه	۸	گسل درونه	۷۰۰	دارد	٦-٥
٦	کاشمر	۸	گسل درونه	۷۰۰	دارد	٦-٥

مأخذ: زمردیان، ۱۳۹۱: ۱۳۸-۱۳۷

۳. ۲. بررسی ویژگی‌های زلزله‌های رخ داده در استان خراسان رضوی

مهم‌ترین نتایج مستخرج از بررسی زلزله‌های رخ داده در استان خراسان رضوی به شرح زیر می‌باشد:

- میانگین بزرگی زلزله‌های اتفاق افتاده در استان بین سال‌های ۲۰۱٤- ۱۹۰۰ میلادی، ٤/٦ ریشتر و بزرگ‌ترین زلزله اتفاق افتاده ۷/۳ ریشتر بوده است. همچنین ۷٦/۳۸ درصد زلزله‌های اتفاق افتاده بین ٥-٤ ریشتر، ۲۰/۱ درصد زلزله‌های اتفاق افتاده بین ٦-٥ ریشتر، ۳/۰۱ درصد زلزله‌های اتفاق افتاده بین ۷-٦ ریشتر و ۰/٥ درصد نیز بیش از ۷ ریشتر بوده است.
- بررسی عمق کانونی زمین‌لرزه‌های رخ داده در استان نشان می‌دهد بیش از ۹۰٪ از این زمین‌لرزه‌ها دارای ژرفای کانونی کم‌تر از ٤۰ کیلومتر بوده و ۷۹٪ از آن‌ها نیز دارای عمق کانونی بین ۱۰ تا ٤۰ کیلومتر می‌باشند.
- کمترین عمق زلزله‌های اتفاق افتاده در ۱ کیلومتری سطح زمین، بیشترین عمق در ٦٤ کیلومتری و میانگین عمق، ۲۰/۹٦ کیلومتری سطح زمین بوده است.
- فراوانی ساعت وقوع زلزله‌ها طی ۲٤ ساعت شبانه‌روز به تفکیک در فصول مختلف، از بعد ظهر تا ساعات اولیه بامداد رخ داده که اوج آن برای بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب در ساعات ۱، ۲٤، ۲۳ و ۲۲ است. کمترین تعداد زلزله‌ها نیز در این فصول به ترتیب در ساعات ٥، ٤، ۸ و ۱۲ اتفاق افتاده است.

جدول زیر مهم‌ترین مشخصات زلزله‌های اتفاق افتاده در استان خراسان رضوی را به تفکیک فصل ارائه می‌نماید. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد فصل زمستان بیشترین فراوانی را از نظر تعداد (۳٥/٦۷ درصد) زلزله‌های رخ داده در میان سایر فصول دارد. همچنین این فصل کمترین میانگین عمق و بزرگ‌ترین زلزله‌های رخ داده طی دوره زمانی ۲۰۱٤- ۱۹۰۰ میلادی را در میان سایر فصول داراست.

جدول ۳: مهم‌ترین مشخصات زلزله‌های رخ داده در استان خراسان رضوی

گویه/ فصل		بهار	تابستان	پاییز	زمستان
تعداد زلزله		۳۸	٤۸	٤۲	۷۱
عمق وقوع زلزله (کیلومتر)	کمترین	۱	۱	۲	۱
	بیشترین	٤۲	۵۳	٦٤	۵۲
	میانگین	۲۲/۳٤	۲۲/٤۳	۲۳/٤۸	۱۸/۲۳
بزرگی زلزله (ریشتر)	کمترین	٤	٤	٤	٤
	بیشترین	٦/۳	٦/٤	۵/۹	۷/۳
	میانگین	٤/٦	٤/۵	٤/٦	٤/٦
ساعت وقوع زلزله (فراوانی)	۱-٦	۸	۹	۹	۱۰
	٦-۱۲	۱۱	۱۳	۹	۲۱
	۱۲-۱۸	۸	۱۲	۱۰	۲۳
	۱۸-۲٤	۱۱	۱٤	۱٤	۱۷

مأخذ: یافته‌های پژوهش

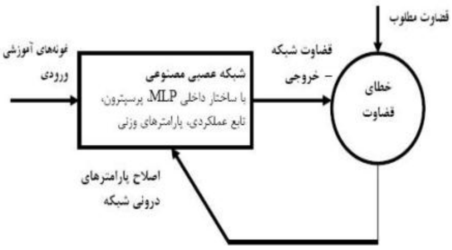
۳. مواد و روش‌ها

شبکه‌های عصبی مصنوعی[1] مدل‌های ریاضی هستند که نحوه عملکرد مغز انسان را تقلید می‌کنند و توانایی آن‌ها در استخراج الگوها از داده‌های مشاهده شده بدون نیاز به داشتن مفروضاتی در مورد روابط بین متغیرهاست (خلیلی و نوبهار، ۱۳۹۰: ۱۱٦). این نوع شبکه‌ها یکی از انواع الگوهای غیرخطی هستند که مهم‌ترین مزیتشان در مقایسه با سایر الگوهای غیرخطی این است که شبکه‌های عصبی برآورد کننده‌های جامع بوده و می‌توانند طیف گسترده‌ای از توابع را با درجه دقت بالا برآورد کنند (شاهنوشی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۰۹). در این شبکه‌ها به طور ذاتی، دسته‌ای از ورودی‌ها بکار برده می‌شوند که هر کدام معرف خروجی سلول عصبی دیگر هستند. هر ورودی شبکه در وزن متناظرش که بیانگر قدرت اتصالی است ضرب می‌شود و سپس همه این ورودی‌های وزن‌دار با یکدیگر جمع می‌گردند تا سطح تحریک سلول عصبی را معین نمایند (مقدم، ۱۳۸۸: ۵۹). علی‌رغم تنوع در الگوهای شبکه، تقریباً همه آن‌ها بر اساس این ساختار بنا نهاده شده‌اند. در این میان میزان فعالیت هر یک از این اتصالات توسط اطلاعات تاریخی تنظیم می‌شود (فرآیند یادگیری، شکل ٤) و در نهایت مدل قادر خواهد بود قوانین مرتبط میان ورودی‌ها و خروجی‌ها را هرچند غیرخطی و پیچیده باشد، کشف نماید (کیا، ۱۳۸۹: ٤۸).

مدلی از شبکه‌های عصبی که در دسته‌بندی و خوشه‌بندی داده‌ها به کار می‌رود، شبکه‌های عصبی خودسازمان‌ده[2] است. این مدل را اولین بار کوهونن[3] معرفی کرد و به مدل کوهونن معروف گردید. ریشه قانون یادگیری کوهونن به

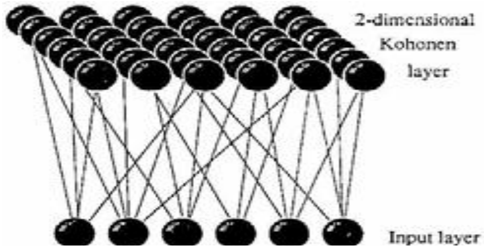
1 Artificial Neural Networks (ANN)
2 Self Organization Feature Maps (SOM or SOFM)
3 Kohonen

سال‌های ۱۹٦۲ و به مباحث خوشه‌بندی بدون نظارت[1] برمی‌گردد (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۱۸). هدف اساسی شبکه عصبی خودسازمان‌ده بدون نظارت کوهونن، تبدیل الگوی ورودی با ابعاد اختیاری به الگویی گسسته با یک یا دو بعد است. در این نوع از شبکه‌ها که از روش یادگیری رقابتی برای آموزش استفاده می‌شود، واحدهای پردازش گر در نرون‌های یک شبکه یک بعدی، دو بعدی یا بیشتر قرار داده می‌شوند. نرون‌ها در یک فرایند رقابتی یادگیری نسبت به الگوهای ورودی منظم می‌شوند (انوار و همکاران، ۱۳۸٦: ۳). هنگامی‌که الگوریتم شبکه عصبی خودسازمان‌ده کوهونن هم‌گرا شد، الگوی مشخصات محاسبه شده با این الگوریتم، مشخصات آماری مهم فضای ورودی را نشان می‌دهد. این خاصیت حاکی از آن است که اگر داده‌های ورودی دارای یک توزیع غیرخطی در فضای ورودی باشد، الگوی خود سازمان ده قادر است که بهترین مشخصه‌ها را از طریق خوشه‌بندی برای تقریب توزیع موجود در داده‌های ورودی انتخاب کند. نمای شماتیک توپولوژی چنین شبکه‌هایی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه از دو لایه ورودی و خروجی تشکیل شده که تعداد نرون‌ها در لایه ورودی بر اساس بردار ورودی مشخص می‌شود و لایه خروجی که معمولاً یک یا دو بعدی است ترکیبی از نرون‌ها می‌باشد که با یکدیگر ارتباط دارند.



شکل ٤: فرایند یادگیری در نرون

مأخذ: اصغری اسکوئی، ۱۳۸۱: ۷۲



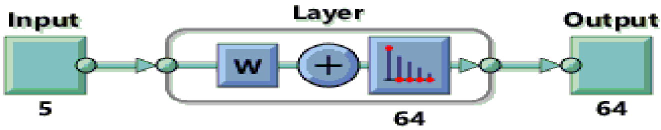
شکل ۵: نمونه‌ای از توپولوژی یک شبکه خودسازمان‌ده

مأخذ: انوار و همکاران، ۱۳۸٦: ۳

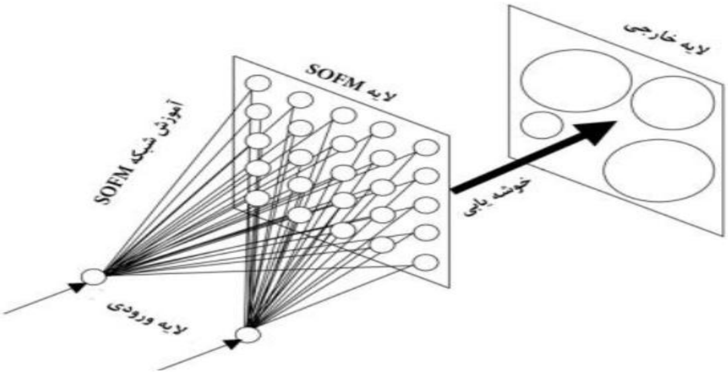
دلیل انتخاب شبکه عصبی کوهونن این است که این شبکه‌ها قادرند حجم زیادی از اطلاعات ورودی را به‌طور همزمان و به صورت موازی دسته‌بندی کنند و الگوهای لرزه‌ای را به‌خوبی تشخیص دهند. استفاده از شبکه عصبی کوهونن به دلیل وجود مدل‌های آماری در الگوریتم درونی سبب شده است برخلاف اغلب روش‌های آماری نیازی به وجود فرضیه‌های زیاد نباشد. در نهایت با توجه به بررسی آماری انجام شده درصد احتمال وقوع زلزله در منطقه مورد نظر ارزیابی شده و سپس نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی در استان خراسان رضوی ترسیم گردیده است. شکل ٦ نمای شماتیک شبکه طراحی شده در نرم‌افزار مطلب برای پیش‌بینی مکان‌های زلزله احتمالی آینده و شکل ۷ نیز ساختار شبکه عصبی کوهونن استفاده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

---

1 Unsupervised



شکل ٦: نمای شماتیک شبکه طراحی شده در نرم‌افزار مطلب



شکل ۷: ساختار شبکه عصبی کوهونن استفاده شده در پژوهش

لازم به ذکر است که داده‌های مورد استفاده در پژوهش از طریق اطلاعات موجود در سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با ویژگی‌های مکان وقوع زلزله (طول و عرض جغرافیایی)، ساعت وقوع زلزله، بزرگی زلزله و عمق وقوع زلزله در محدوده استان خراسان رضوی از ابتدای سال ۱۹۰۰ میلادی تا انتهای سال ۲۰۱۳ میلادی استخراج شده است. همچنین تعداد زلزله‌های رخ‌داده در این محدوده زمانی که بزرگی آن‌ها بین ٤ تا ۸ ریشتر بوده است، ۱۹۹ مورد می‌باشد. لازم به ذکر است که جهت ارزیابی دقت مدل شبکه عصبی استفاده شده در پژوهش از روش‌های آماری جذر میانگین مربع خطا[1]، میانگین خطای بایاس[2] و میانگین خطای مطلق[3] استفاده شده است.

۱. روش جذر میانگین مربع خطا اندازه واقعی خطای تولید شده را نشان می‌دهد و از فرمول زیر به دست می‌آید. این روش میزان خطای بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند. در این مدل معمولاً مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده با یکدیگر مقایسه می‌گردند. این شاخص، ابتدا اختلاف تک تک مقادیر مشاهده شده را با مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل محاسبه نموده و به توان دو می‌رساند. از این اختلافات، میانگین گرفته و در نهایت جذر عدد میانگین را ارائه می‌دهد که همان RMSE است. این شاخص معیاری برای دقت نتایج است و معمولاً هرچه مدل بهتر بر داده‌ها منطبق باشد مقدار آن کمتر می‌شود (خزاعی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۷).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \hat{x}_i)^2}$$

1 Root Mean Square Error (RMSE)
2 Mean Bias Error (MBE)
3 Mean Absolute Error (MAE)

۲. میانگین خطای بایاس، درجه تطابق بین میانگین پیش‌بینی و میانگین مشاهده شده را نشان می‌دهد. این معیار که بیانگر میانگین انحراف است علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل) مقدار انحراف از مقادیر مشاهده شده را نشان می‌دهد. این معیار اگر برابر صفر باشد، نشان می‌دهد که برآورد مدل خوب بوده و در آن هیچ گونه انحرافی وجود ندارد و از رابطه زیر قابل اندازه‌گیری است.

$$MBE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)$$

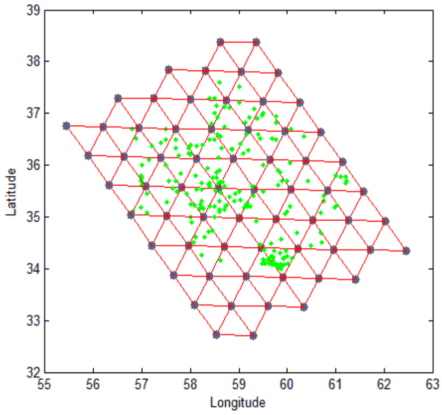
۳. میانگین خطای مطلق که بوسیله معادله زیر محاسبه می‌شود، صحت مدل را تعیین می‌کند. مقدار صفر این معیار نشان دهنده صحت ۱۰۰٪ است و هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد حاکی از کم شدن صحت مدل است (کاظمی پشت مساوی و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۰۷).

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i|$$

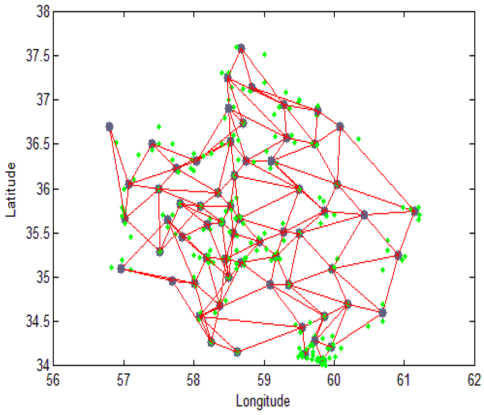
٤. بحث و نتایج

۱. ٤. روند آموزش و هم‌گرایی وزن‌های نرون‌ها

هر زمین‌لرزه بزرگ، احتمال رویداد زمین‌لرزه‌های بعدی را در یک فاصله از چشمه لرزه زا و برای یک دوره زمانی تغییر می‌دهد. ارزیابی احتمال خطر زمین‌لرزه برای دوره زمانی مشخص، تنها تا رخداد زمین‌لرزه بزرگ بعدی اعتبار دارد و بعد از رخداد زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ٤ ریشتر باید محاسبات انجام شده را تجدید کرد. این نگرش آماری عموماً از خوشه‌ای شدن زلزله‌ها در زمان با تغییر در شرایط زمین‌شناختی نشأت می‌گیرد. داده‌های استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی، دارای ۵ متغیر وابسته طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، ساعت وقوع زلزله، عمق وقوع زلزله و بزرگی زلزله می‌باشد. لذا به‌منظور پیش‌بینی مکان زلزله از شبکه عصبی خودسازمان‌ده که یک الگوریتم خوشه‌بندی در حوزه یادگیری می‌باشد، استفاده شده است. برای پیش‌بینی مکان وقوع احتمالی زلزله ابتدا وزن‌ها و شبکه اولیه به‌صورت شکل ۸ در دو بُعد طول و عرض جغرافیایی انتخاب گردید. شکل ۹ نیز نشان دهنده رفتار الگوریتمیک شبکه عصبی بکار رفته از نظر توپولوژی نرون‌ها در حین انتهای آموزش است.



شکل ۸: وزن و شبکه اولیه طراحی شده در نرم‌افزار مطلب



شکل ۹: رفتار الگوریتمیک شبکه عصبی از نظر توپولوژی نرون‌ها در انتهای آموزش

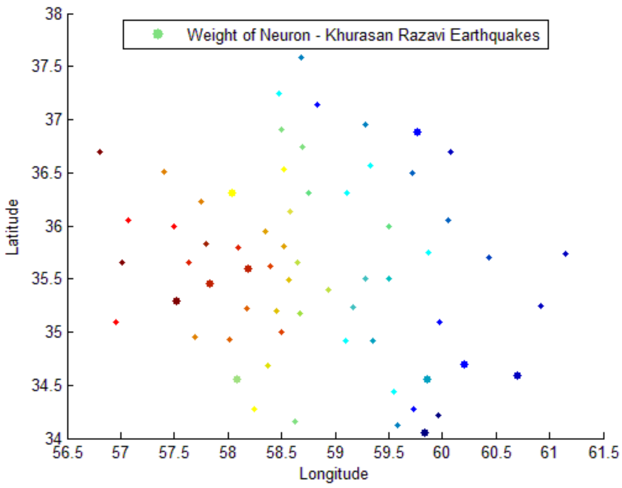
با توجه به اشکال ۸ و ۹ نرون‌ها شروع به حرکت به سمت گروه‌های آموزشی مختلف می‌کنند و سبب هم گرا شدن شبکه عصبی می‌شوند. سپس تعلق تعداد نمونه‌ها به هر کدام از نرون‌های ۸*۸ محاسبه و در نهایت نیز فاصله همسایگی میان این نرون‌ها مشخص می‌شود. با وجود حجم فزاینده اطلاعات، عمل بازیابی و خلاصه کردن داده‌های ورودی، معیار خوبی از تابع چگالی احتمال داده‌ها را فراهم آورده است.

۲. ٤. پیش‌بینی مکان وقوع زلزله احتمالی

توان چشمه‌های لرزه زا برای ایجاد زلزله بر اساس سابقه لرزه‌خیزی، میزان جنبش تکتونیکی و ابعاد گسل‌های موجود در این چشمه‌ها تعیین می‌شود. با داشتن سرچشمه‌های لرزه زا با استفاده از خاصیت تجرید در شبکه عصبی کوهونن می‌توان گفت احتمال رخداد زمین‌لرزه در چشمه‌های خوشه شده به مراتب بیشتر است. در مدل‌های شبکه عصبی، یکی از الگوهای ارائه شده مکان خوشه‌ها است که راه حلی را برای یافتن مکان‌های لرزه زا و پرخطر ارائه می‌دهد؛ بنابراین کاملاً بدیهی است که پس از شناسایی مناطق پرخطر لرزه‌ای، منطقه عدم قطعیت کاهش پیدا کرده و مکان پیش‌بینی شده کوچک‌تر شود؛ بنابراین اگر مکان اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم شبکه عصبی کوهونن منحصراً به چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در آن منطقه محدود شود، عدم قطعیت مکانی الگوریتم کاهش یافته و مکان پیش‌بینی شده کوچک‌تر می‌شود (کولاچی[1] و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۱۵) (گرامی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱٤۳۹).به جهت پیش‌بینی مکان وقوع زلزله احتمالی با استفاده از روش شبکه عصبی کوهونن، پس از تعلیق تعداد نمونه‌ها و محاسبه فاصله همسایگی، به مشخصات زلزله‌های اتفاق افتاده در استان خراسان رضوی بر اساس هدف، وزن‌هایی داده شد تا بتوان محاسبات مربوطه را در نرم افزار MATLAB انجام داد.شکل ۱۰ مشخصات مکانی شامل طول و عرض

1 Kulachi

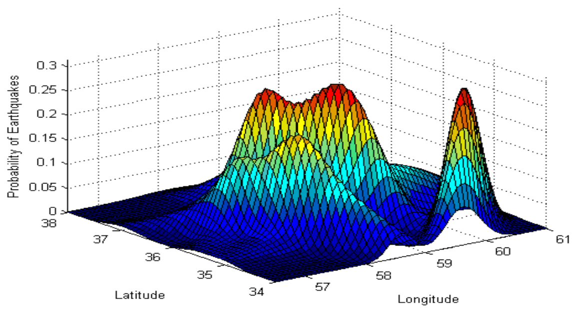
جغرافیایی زلزله‌های پیش‌بینی شده با شبکه عصبی در استان خراسان رضوی را نشان می‌دهد. هر چه قطر دایره نشان داده شده بیشتر باشد، نشان دهنده ریشتر بالاتر زلزله است.



شکل ۱۰: مشخصات مکانی زلزله‌های پیش‌بینی شده با شبکه عصبی در استان خراسان رضوی

۳. ٤. ترسیم نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی

پس از پیش‌بینی مکان وقوع زلزله احتمالی با شبکه عصبی، داده‌های پیش‌بینی شده توسط تحلیل‌های آماری پردازش شده‌اند. برای این منظور از مدل ترکیبی گوسی[1] استفاده شده است. شکل ۱۱ احتمال وقوع زلزله‌ها با توجه به طول و عرض جغرافیایی را نشان می‌دهد.

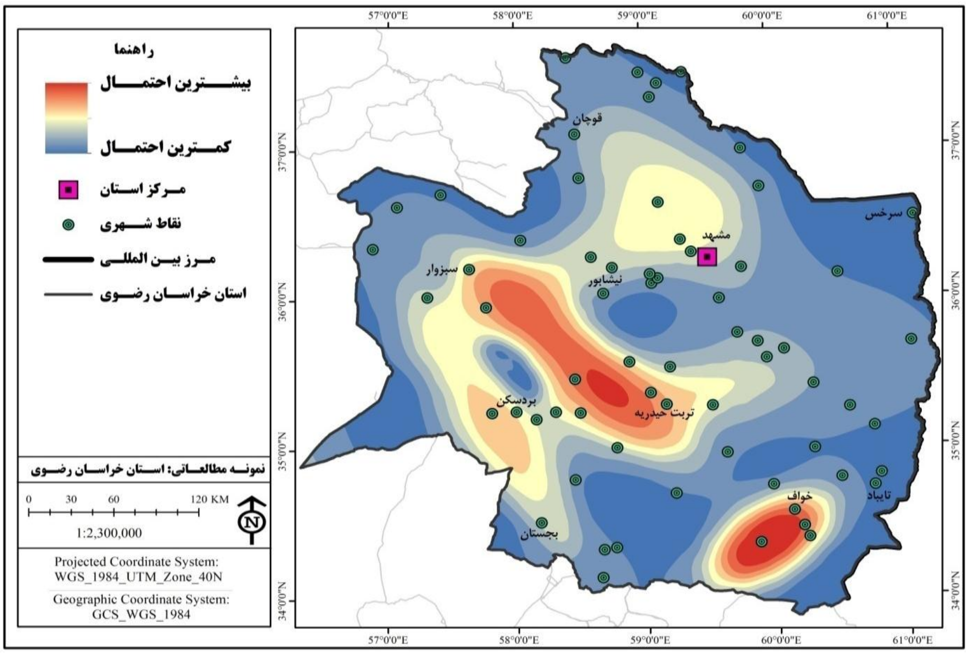


شکل ۱۱: احتمال وقوع زلزله‌ها با توجه به طول و عرض جغرافیایی

بعد از تحلیل داده‌های آماری نقشه پهنه‌بندی درصد لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده برای استان خراسان رضوی نشان داده شده است. از نقشه پهنه‌بندی درصد لرزه‌خیزی می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین احتمال وقوع زلزله در استان

1 Gaussian Mixture Model (GMM)

خراسان رضوی در دو منطقه مرکزی متمایل به غرب و منطقه جنوب شرق این استان بـا احتمـال ۳۰٪ بـالاتر از سـایر مناطق پیش‌بینی شده است.



شکل ۱۲: پهنه‌بندی لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده برای استان خراسان رضوی

جدول ٤ نیز مشخصات پهنه‌های لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده برای استان خراسان رضوی را به تفکیـک میـزان خطـر پهنه‌ها ارائه می‌نماید. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد ۱۲٪ جمعیت شهری و ۱۰٪ جمعیـت روسـتایی اسـتان در پهنـه‌های با خطر نسبتاً بالا و بالا قرار دارد.

جدول ٤: مشخصات پهنه‌های لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده برای استان خراسان رضوی

عوامل	ویژگی	پهنه با خطر بالا	پهنه با خطر نسبتاً بالا	پهنه با خطر متوسط	پهنه با خطر نسبتاً پایین	پهنه با خطر پایین
شهر	درصد تعداد	۸/۳	۱۱/۱	۱۲/۵	۱۹/٤	٤۸/٦
	درصد جمعیت	۱/۱	۱۱	۳/۲	۷۲/۳	۱۲
روستا	درصد تعداد	۲/٦	۵/۷	۱۸/۹	۲٦/۹	٤۵/٦
	درصد جمعیت	۳/۸	٦/۱	۲۳/۸	۲٦/۸	۳۹/۳
مساحت	درصد مساحت	۵/۳	٦/۲	۱۳/۷	۲۰/۵	۵٤/۱

٤. ٤. ارزیابی دقت مدل

در پژوهش حاضر برای به دست آوردن دقت مدل استفاده شده ابتدا محاسبات در نـرم‌افـزار MATLAB انجـام و سپس این داده‌ها وارد نرم‌افزار EXCELL گردید. بعد از این مرحله داده‌ها وارد نرم‌افزار GIS شده و در ایـن نـرم‌افـزار با استفاده از ابزار Select By Location مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده به تفکیک شهرستان‌هـای اسـتان خراسـان رضوی جدا گردیده و دوباره به نرم‌افزار EXCELL وارد شده است. در نهایت با اسـتفاده از ابـزار فرمـول نویسـی در این نرم‌افزار روش‌های آماری RMSE، MBE و MAE به تفکیک هر شهرسـتان محاسـبه و نتـایج آن در جـدول زیـر ارائه شده است.

جدول ٥: نتایج معیارهای آماری ارزیابی دقت مدل پیش‌بینی استفاده شده

شهرستان	RMSE	MBE	MAE	شهرستان	RMSE	MBE	MAE
درگز	۰/٦۳٤	۰/۷۱۸	۰/٦۸٤	تایباد	۰/۵۳۸	۰/۵٤٦	۰/٦۱۵
سرخس	۰/۵۵٤	-۰/۹۸۷	۰/۵۳۵	خواف	۰/٤۹۵	۰/۳۹۸	۰/٤۷٤
کلات	۰/۵۷۳	-۰/۷٦۵	۰/۷۷۲	گناباد	۰/۳۱۷	۰/٤۰۱	۰/٤٦۷
مشهد	۰/٤۱۳	۰/۳۷۸	۰/۵٦٤	کاشمر	۰/۳۰۱	۰/۳۷۳	۰/٤۰۸
چناران	۰/۵۳٤	۰/۵۷۸	۰/۵۱۹	خلیل‌آباد	۰/۳٦۸	۰/۳۰۸	۰/٤۱۸
نیشابور	۰/۵۲۷	۰/٦۸۳	۰/٦٤٦	تربت حیدریه	۰/۳۹۷	۰/٤۱۹	۰/٤۲۳
بردسکن	۰/۵۵٦	-۰/۷۱٦	۰/۷٦۷	رشتخوار	۰/۳۸۷	۰/٤۵۷	۰/٤۹۷
فریمان	۰/٤۱۷	۰/٤۲۹	۰/۵۲٤	سبزوار	۰/۳٦٦	-۰/۳٦۱	۰/٤۵۸
تربت جام	۰/۵۰۲	۰/۵٦۷	۰/۵۷۳	قوچان	۰/٤۱۸	۰/۳۹۸	۰/٤۱۷

بر اساس دیدگاه اکثر پژوهشگران اگر مقدار شاخص RMSE کوچک‌تر از ۰/۱ باشد برازندگی مـدل بسـیار عـالی است. اگر بین ۰/۱ و ۰/۵ باشد برازندگی مدل خوب است و اگر بین ۰/۵ و ۰/۸ باشد برازندگی مدل متوسـط اسـت و بالاتر از ۰/۸ برازندگی مدل ضعیف می‌باشد. بر اساس نتایج جدول فوق، پـیش‌بینـی مـدل در شهرسـتان‌هـای مشـهد، فریمان، خواف، گناباد، کاشمر، خلیل‌آباد، تربت حیدریه، رشتخوار، سبزوار و قوچان خـوب و سـایر شهرسـتان‌هـا نیـز متوسط می‌باشد. این در حالی است که میزان کل خطای RMSE مدل برای استان خراسـان رضـوی ۰/٤٦۰ مـی‌باشـد که نشان دهنده برازندگی خوب مدل می‌باشد. نتایج معیارهای MBE و MAE نیز تأیید کننـده نتـایج معیـار RMSE می‌باشد. میزان کل خطای MBE مدل ۰/۲۷٤ و MAE مدل ۰/٤۱۸ می‌باشد که نشان دهنده پـیش‌بینـی خـوب مـدل می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

زمین‌لرزه‌ها همانند سایر فعل‌وانفعالات طبیعی نظیر سیل، طوفان و ... برای ادامه حیات و برقراری اعتدال و انتظام در طبیعت نمودار می‌شود و برای زندگی زمین وجود آن ضروری است. بر این اساس انسان به‌موازات افزایش دانش خود از این پدیده‌ها توانسته خود را از آثار و صدمات ناشی از آن مصون بدارد. کشور ما با موقعیت خاص زمین‌شناسی (واقع شدن در کمربند زلزله) و استقرار کانون‌های زیستی به‌ویژه شهرها در پهنه‌های پرخطر، بالقوه در معرض تهدید زمین‌لرزه قرار دارد؛ لذا در پژوهش حاضر با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی کوهونن و مشخصات زلزله‌های رخ داده در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۲۰۱٤–۱۹۰۰ میلادی به پیش‌بینی مکان زلزله‌های احتمالی آینده در این استان پرداخته شده است. برآورد درصد احتمال وقوع زلزله‌های آتی در منطقه مورد نظر می‌تواند در افزایش توجه به طراحی سازه‌ها در مکان‌های پیش‌بینی شده و همچنین بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود در این محل‌ها نقش اساسی داشته باشد و در اولویت برنامه‌ریزی برای برنامه‌ریزان و مدیران استان قرار گیرد. در این پژوهش پس از پیش‌بینی مکان‌های وقوع زلزله، با بررسی‌های آماری انجام شده، نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی ترسیم گردیده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ۱۲٪ جمعیت شهری و ۱۰٪ جمعیت روستایی استان در پهنه‌های با خطر نسبتاً بالا و بالا قرار دارد و بیشترین احتمال وقوع زلزله در منطقه مرکزی متمایل به غرب استان (شهرستان کاشمر و جنوب شرق شهرستان سبزوار) و جنوب شرق شهرستان بردسکن با احتمال ۳۰٪ و در منطقه جنوب شرق (شهرستان خواف) با احتمال ۳۰٪، بالاتر نسبت به سایر مناطق پیش‌بینی شده است؛ این در حالی است که در شهرستان‌های کاشمر، سبزوار، بردسکن و خواف به ترتیب ۱۰، ۱٦, ۱۷ و ۱۸ درصد ابنیه و مساکن از مصالح اسکلت فلزی و بتن‌آرمه استفاده شده است و ۸۹, ۸۳, ۸۲ و ۸۰ درصد مساکن این شهرستان‌ها از سنگ، آجر، چوب، خشت و گل تشکیل شده است که در صورت بروز زلزله احتمالی می‌تواند خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری را به وجود آورد. با توجه به اینکه مدل شبکه عصبی کوهونن توانسته تا حد خوبی محدوده‌هایی را که احتمال رخداد زلزله در آن‌ها بیشتر از سایر فضاهای استان می‌باشد، پیش‌بینی کند؛ لذا پیشنهادهای زیر جهت کاهش خسارات هنگام بروز زلزله با ارجحیت برنامه‌ریزی برای پهنه‌های با اولویت بالا ارائه می‌گردد:

۱. تهیه طرح‌های موضعی برای پهنه‌های آسیب‌پذیر؛

۲. مقاوم‌سازی ساختمان‌های حیاتی و مهم؛

۳. احداث ایستگاه‌های زلزله سنجی؛

٤. طراحی بناهای مناسب و مقاوم؛

۵. اصلاح نظام ارتباطات.

کتابنامه

اصغری اسکوئی، محمدرضا؛ ۱۳۸۱. کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی سری‌های زمانی. فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران. شماره ۱۲. ۹۷-۶۹.

اکبری مطلق، مصطفی؛ عباس زاده، غلامرضا؛ امینیان، امیر احمد؛ ۱۳۹۱. آسیب‌پذیری مجموعه شهری مشهد و مدیریت بحران آن در مقابل زلزله با تأکید بر تجارب جهانی. فصلنامه آمایش و توسعه پایدار. شماره ۳. ۲۳-۷.

انوار، سید احمد؛ دستغیبی فرد، غلامحسین؛ نیکویی، احسان؛ مغاره، رسول؛ ۱۳۸۶. بررسی مطالعات انجام شده در زمینه پیش‌بینی زلزله با استفاده از الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی. پنجمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله. ۲۶-۲۳ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۶. تهران.

آرین، مهران؛ ۱۳۸۲. ایران و دلایل زمین‌شناختی زمین‌لرزه. ماهنامه شهرداری‌ها. ویژه‌نامه شماره ۱۲. ٤٥-۳۸.

برگی، خسرو؛ ۱۳۹۲. اصول مهندسی زلزله. تهران: انتشارات دانشگاه تهران. چاپ دهم. ۵۷٤ صفحه.

پورمحمدی، محمدرضا؛ مصیب زاده، علی؛ ۱۳۸۷. آسیب‌پذیری شهرهای ایران در برابر زلزله و نقش مشارکت محله‌ای در امدادرسانی آن‌ها. فصلنامه جغرافیا و توسعه. شماره ۱۲. ۱٤٤-۱۱۷.

جهاد دانشگاهی مشهد؛ ۱۳۸۹. مطالعات آمایش استان خراسان رضوی؛ تحلیل و ارزیابی موقعیت طبیعی و محیط زیستی. مشهد: استانداری خراسان رضوی. ۱٤۹ صفحه.

جهاد دانشگاهی مشهد؛ ۱۳۸۹. مطالعات آمایش استان خراسان رضوی؛ ملاحظات دفاعی- امنیتی در آمایش استان. مشهد: استانداری خراسان رضوی، ۲۵۷ صفحه.

حیاتی، سلمان؛ قربانی، علی؛ اسماعیلی، آسیه؛ قنبری، محمد؛ ۱۳۹٤. بررسی آسیب پذیری شهرهای ایران هنگام وقوع زلزله (نمونه: شهر مشهد). دومین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و زیر ساخت‌های شهری. ۸-۷ مرداد ماه ۱۳۹٤. تبریز.

خاکپور، براتعلی؛ حیاتی، سلمان؛ کاظمی بی‌نیاز، مهدی؛ ربانی ابوالفضلی، غزاله؛ ۱۳۹۲. مقایسه تطبیقی/ تحلیلی میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری در برابر زلزله با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی و فازی (نمونه موردی: شهر لامرد). فصلنامه آمایش محیط. شماره ۲۲. ۳۸-۲۱.

خزاعی، الهه؛ آل شیخ، علی اصغر؛ کریمی، محمد؛ وحیدنیا، محمد حسن؛ ۱۳۹۱. مقایسه دو روش مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی – فازی در پیش‌بینی غلظت آلاینده مونوکسید کربن. فصلنامه محیط شناسی. شماره ٤. ۲۹-٤٤.

خطیری یانسری، محمدرضا؛ امامی، بهنام؛ یزدی، مهدی؛ شاهکویی، عبدالحمید؛ ۱۳۸۷. معرفی روش‌های پیش‌بینی زلزله با استفاده از پیش‌نشانگرها. اولین کنفرانس بین‌المللی مقاوم‌سازی لرزه‌ای. ۲۹ مهر الی ۱ آبان ماه ۱۳۸۷. تبریز.

خلیلی عراقی، منصور؛ نوبهار، الهام؛ ۱۳۹۰. پیش‌بینی قیمت مسکن در شهر تبریز: کاربرد مدل‌های قیمت هدانیک و شبکه عصبی مصنوعی. فصلنامه پژوهش‌ها و سیاست‌های اقتصادی. شماره ٦۰. ۱۳۸- ۱۱۳.

زمردیان، محمدجعفر؛ ۱۳۹۱. ژئومورفولوژی ایران؛ فرایندهای ساختمانی و دینامیک‌های درونی. مشهد: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. چاپ ششم. ۲۸٤ صفحه.

سلطانی، آزاده؛ صدوقی یزدی، هادی؛ اشک زری طوسی، سهیلا؛ روحانی، مجتبی؛ ۱۳۸۹. بهبود شبکه خودسازمان‌ده کوهونن با هدف خوشه‌بندی داده‌های فازی. دهمین کنفرانس سیستم‌های فازی ایران. ۲٤–۲۲ تیرماه ۱۳۸۹. تهران.

شاهنوشی، ناصر؛ ژاله رجبی، میترا؛ فیروز زارع، علی؛ غفاری، عباس؛ ۱۳۹۲. شناسایی عامل‌های مؤثر در ایجاد ضایعات نان و تمایز نانوایی‌ها با کاربرد تجزیه‌وتحلیل تمایزی و شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر آن (مطالعه موردی شهر مشهد). فصلنامه اقتصاد کشاورزی. شماره ۳. ۱۳۲–۱۰۱.

شایان، سیاوش؛ زارع، غلامرضا؛ حق پناه، یعقوب؛ ۱۳۹۲. زلزله‌خیزی ایران و مقاوم‌سازی مدارس. مجله رشد آموزش جغرافیا. شماره ۳. ۲۵–۱۹.

فرجی، امین؛ قرخلو، مهدی؛ ۱۳۸۹. زلزله و مدیریت بحران مطالعه موردی شهر بابل. مجله جغرافیا (فصلنامه علمی– پژوهشی انجمن جغرافیای ایران). شماره ۲۵. ۱٦۵–۱٤۳.

کاظمی پشت مساوی، حسین؛ طهماسبی سروستانی، زین العابدین؛ کامکار، بهنام؛ شتایی، شعبان؛ صادقی، سهراب؛ ۱۳۹۱. ارزیابی روش‌های زمین آمار جهت تخمین و پهنه‌بندی عناصر غذایی پر مصرف اولیه در برخی اراضی کشاورزی استان گلستان. نشریه دانش آب و خاک. شماره ۱. ۲۱۸–۲۰۱.

کیا، سید مصطفی؛ ۱۳۸۷. شبکه‌های عصبی در MATLAB. تهران: شرکت تعاونی خدمات نشر کیان رایانه سبز. چاپ سوم. ۲۳۲ صفحه.

گرامی، محسن؛ سیوندی پور، عباس؛ تقدیسی، هادی؛ ۱۳۹۱. پیش‌بینی آماری پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. نشریه زمین‌شناسی مهندسی. شماره ۱. ۱٤٤٤–۱٤۲۹.

مرکز آمار ایران؛ ۱۳۹۰. نتایج تفصیلی سرشماری عموم و مسکن سال ۱۳۹۰.

مقدم، معصومه؛ ۱۳۸۸. ارزیابی تغییرات کاربری اراضی در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل درون شهری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (نمونه موردی: شهر زنجان). مشکینی، ابوالفضل. دانشگاه زنجان. گروه جغرافیا.

نگارش، حسین؛ ۱۳۸٤. **زلزله، شهرها و گسل‌ها**. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۵۲. ۵۱–۳٤.

Shahnoushi, N., Zhaleh Rajabi, M., Firouz Zare, A., & Ghaffari, A. (2013). The effective factors in the development and differentiation of lesions bread bakeries using discriminant analysis and artificial neural network-based (Case study: Mashhad). *Journal of Agricultural Economics*, *3*, 101-132.

Shayan, S., Zare, G., & Haghpanah, Y. (2013). Iran and seismic retrofitting schools. *Journal of Geography Education*, *3*, 19-25.

Statistical Center of Iran. (2011). *Detailed results of the general census and housing*, Statistical Center of Iran.

Zomorodian, M. J. (2012). *Iran geomorphological processes internal structure and dynamics(6$_{th}$ ed.)* . Mashhad: Ferdowsi University Press.